

МЕТАЛУРГІЯ СТАЛІ

УДК 621.74.047:658.52.011.56

©Скребцов А.М.¹, Федосов А.В.², Пащук Д.В.³, Ларионова С.В.⁴

О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ФОРМИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО СЛИТКА

Проанализированы методы определения скорости и времени затвердевания металла для отливок и слитков различных типов. Предложено уравнение для определения глубины жидкой лунки непрерывнолитых слитков в зависимости от их приведенной толщины и скорости разливки металла.

Ключевые слова: непрерывнолитой слиток, приведенная толщина, скорость разливки металла, глубина жидкой лунки, машина непрерывного литья заготовок.

Скребцов О.М., Федосов А.В., Пащук Д.В., Ларионова С.В. О закономірностях формування безперервнолитого зливка. Проведено аналіз методів визначення швидкості та часу твердіння металу для відливок та злитків різних типів. Запропоновано рівняння для визначення глибини рідкої лунки у безперервнолитих злитків в залежності від їх приведеної товщини та швидкості розливки металу.

Ключові слова: безперервнолитий злиток, приведена товщина, швидкість розливки металу, глибина рідкої лунки, машина безперервного лиття заготовок.

O.M. Skrebcov, A.V. Fedosov, D.V. Paschuk, S.V. Larionova. On regularities of ingot's formation. The methods of determination of speed and time of metal hardening for ingots of different types are analyzed. The equation for determination of strand liquid pool length depth according to its reduced thickness and casting speed is offered.

Keywords: strand, reduced thickness, casting speed, liquid pool length, continuous casting machine.

Постановка проблемы. В процессе получения непрерывнолитых заготовок одним из важнейших параметров является глубина жидкой лунки. Значение этой величины является параметром ограничивающим скорость вытягивания непрерывнолитых заготовок. Несмотря на это в литературе встречается недостаточное количество экспериментальных работ и обобщений по вопросам формирования непрерывнолитого слитка, в частности по глубине лунки жидкого металла в зависимости от профиля литой заготовки, и скорости вытягивания ее из кристаллизатора.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросами закономерностей затвердевания слитков и отливок металлурги занимаются очень давно. Русский металлург А.С. Лавров еще в 1866г. предложил определять толщину затвердевшего металла в отливке или слитке к определенному моменту времени путем выливания жидкой сердцевины расплава [1]. Академик Н.Т. Гудцов в 1936г. предложил определять окончание затвердевания слоя металла с помощью термпары [1]. Эти методы металлурги используют до сих пор.

Большой прогресс в изучении особенностей формирования отливок и всех типов слитков, в т.ч. и непрерывнолитых, был достигнут в 50-ые–60-ые гг. прошлого века с появлением, и его описанием в литературе, метода радиоактивных изотопов [2, 3, 4 и др.]. К общим вопросам металлургических исследований с помощью радиоизотопов в работах [3, 4] рассмотрены также

¹ д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² канд. техн. наук, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

³ начальник отдела непрерывной разливки стали технического управления ПАО «МК «Азовсталь», г. Мариуполь

⁴ ассистент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

конкретные вопросы технологии получения непрерывнолитых слитков.

При математическом описании результатов опытов по затвердеванию металла в металлургии к настоящему времени сформировались следующие подходы.

Первое полное решение задачи о промерзании влажного грунта было получено австрийским математиком Д. Стефаном в 1889г [1]. Решение задачи имеет вид:

$$x = K\sqrt{\tau}, \quad (1)$$

где x – толщина промерзшего грунта к моменту времени τ от начала процесса;
 K – эмпирическая константа.

Так называемый «закон квадратного корня» (1) металлурги используют очень широко во многих случаях затвердевания различных металлов в различных формах. В каждом случае находят эмпирическую величину K , которая зависит от вида процесса.

В науке обращают внимание на то, что уравнение Д. Стефана для подавляющего большинства случаев затвердевания расплавов является приближенным. Уравнение (1) получено для следующих условий: а) температура на поверхности тела постоянна, б) длина тела бесконечная и в) фронт затвердевания плоский. Эти условия в реальных случаях не соблюдаются. Поэтому закон Д. Стефана применим только к двум зонам отливки – корковой и дендритной.

Второе решение задачи затвердевания обычных и непрерывнолитых слитков предложил Б.Б. Гуляев [5]. Он считал, что для затвердевания металлов в разных литейных формах можно использовать теорию подобия явлений и применить уравнение:

$$x/R = f(F_0), \quad (2)$$

где x – толщина затвердевшего металла, м;
 F_0 – критерий Фурье.

$$F_0 = a\tau/R^2,$$

где a – коэффициент температуропроводности металла, м²/с;
 τ – время от начала процесса, с;
 R – половина толщины слитка или отливки, м.

Обработка имеющихся в литературе экспериментальных данных по обычным и непрерывным слиткам по формуле (2) приведена в публикации [2, с. 265]. Из расположения точек на координатном поле видна недостаточно точная, скорее, приближенная зависимость величин.

Третье решение задачи затвердевания различных отливок принадлежит Н.И. Хворинину [6]. Он ввел понятие приведенной толщины отливки R_0 и связал ее с полным временем затвердевания металла τ_0 :

$$R_0 = V/S. \quad (3)$$

$$\tau_0 = K_0\sqrt{R_0}, \quad (3a)$$

где V – объем отливки, м³;
 S – площадь ее наружной поверхности, м²;
 K_0 – константа.

Для отливок различных конфигураций и масс точки их полного затвердевания τ_0 в зависимости от величины R_0 с высокой степенью корреляции укладываются на одну линию.

Цель статьи – найти обобщающую аналитическую зависимость для глубины лунки жидкого металла в сердцевине слитка, в зависимости от скорости его вытягивания ν из кристаллизатора, и приведенной толщины R_0 .

Изложение основного материала. Аналитической формулы, названной в цели статьи, в литературе не существует. Однако имеются следующие, довольно скудные экспериментальные данные. В работе [4] с помощью заливки в жидкую сердцевину расплавленного свинца определили глубину лунки L в непрерывном слитке, равную 1900 мм при его сечении 150×300 мм и скорости

вытягивания 315 мм/мин. Аналогичным образом в другом опыте нашли $L = 4160$ мм, при сечении слитка 150×475 мм и скорости вытягивания 700 мм/мин.

В работе [7] приведены формулы для вычисления глубины жидкой фазы L в непрерывнолитых слитках:

- для прямоугольных слитков шириной до 1200 мм

$$L = 0,029 \cdot a^2 \cdot v; \quad (4)$$

- для прямоугольных слитков шириной более 1200 мм

$$L = 0,034 \cdot a^2 \cdot v; \quad (5)$$

- для квадратных слитков

$$L = 0,024 \cdot a^2 \cdot v; \quad (6)$$

где L в мм;

a – сторона квадрата, или толщина сляба, см;

v – скорость вытягивания заготовки, мм/мин.

Кроме этого в работе [7] приведены номограммы для определения глубины лунки жидкой стали в непрерывнолитом слитке в зависимости от скорости разливки металла и формы слитка (квадратный или прямоугольный).

В расчетах для единообразия данных по любым формам слитков использовали понятие приведенной толщины отливки по формуле (3). Для непрерывного слитка формула (3) будет преобразована в следующий вид:

$$R_0 = \frac{V}{S} = \frac{abh}{(2a+2b)h} = \frac{ab}{2(a+b)}, \quad (7)$$

где a, b – стороны сляба, м;

h – произвольный отрезок его высоты, м.

Из формулы (7) видно, что для непрерывного слитка приведенная толщина равна площади его поперечного сечения, разделенной на внешний периметр.

Для получения аналитической зависимости $L = f(R_0, v)$ были обобщены данные по глубине жидкой лунки для слитков с различным поперечным сечением при различных скоростях вытягивания, представленные в источниках [4, 7-9] (таблица).

Таблица

Сводные данные о глубине жидкой лунки

Глубина лунки по номограмме (эксперимент), мм	Глубина лунки по формулам ($L=0,024 \cdot a^2 \cdot v$ и $L=0,029 \cdot a^2 \cdot v$), мм	v , мм/мин	Толщина, мм	Ширина, мм	Приведенная толщина, мм	Глубина лунки по зависимости $L=f(R_0, v)$, мм	Отклонение от эксперимента, %	Тип слитка
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10000	13068	500	330	330	82,5	10202	2	Квадратные слитки
5600	4800	500	200	200	50,0	3747	33	
5009	5760	600	200	200	50,0	4063	19	
4914	5760	600	200	200	50,0	4063	17	
4474	5760	600	200	200	50,0	4063	9	
4259	5760	600	200	200	50,0	4063	5	
5800	4410	600	175	420	61,8	6200	7	
7350	4410	600	175	420	61,8	6200	16	
6600	6720	700	200	200	50,0	4406	33	
1000	1176	1000	70	70	17,5	688	31	
2000	2400	1000	100	100	25,0	1404	30	

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9
8176	9600	1000	200	200	50,0	5617	31	Квадратные слитки
2200	2352	2000	70	70	17,5	1546	30	
4800	4800	2000	100	100	25,0	3155	34	
10000	10800	2000	150	150	37,5	7099	29	
3000	2940	2500	70	70	17,5	2317	23	
6000	6000	2500	100	100	25,0	4729	21	
13500	13500	2500	150	150	37,5	10641	21	
3500	3528	3000	70	70	17,5	3473	1	
8200	7200	3000	100	100	25,0	7089	14	
16000	16200	3000	150	150	37,5	15949	0	
4500	4454,4	600	160	480	60	5851	30	Прямоугольные слитки
7500	6960	600	200	600	75	9142	22	
8500	6960	600	200	1000	83,3	11287	33	
14000	10875	600	250	1250	104,2	17636	26	
4160	3240	600	150	480	57,1	5307	28	
19180	12687,5	700	250	2500	113,6	22758	19	
7425	7424	1000	160	480	60,0	8088	9	
11600	11600	1000	200	600	75,0	12638	9	
18125	18125	1000	250	750	93,8	19747	9	
7425	7424	1000	160	800	66,7	9986	34	
28120	18125	1000	250	2500	113,6	29013	3	
33590	21931,25	1000	275	2500	123,9	34476	3	
12300	6525	1000	150	2500	70,8	11248	9	
28360	18125	1000	250	2500	113,6	29013	2	
23640	18125	1000	250	2500	113,6	29013	23	
27380	18125	1000	250	2500	113,6	29013	6	
16000	14848	2000	160	480	60,0	18173	14	
25000	23200	2000	200	600	75,0	28395	14	
39000	36250	2000	250	750	93,8	44368	14	
18000	14848	2000	160	800	66,7	22436	25	
28000	23200	2000	200	1000	83,3	35056	25	
43000	36250	2000	250	1250	104,2	54775	27	

На основании табличных данных был построен ряд зависимостей вида $L = f(R_0^2)$ (рис. 1), из которых видно, что анализируемые данные хорошо описываются прямолинейной зависимостью берущей начало в центре координатной плоскости. Величины достоверности аппроксимации имеют близкие к единице значения, что свидетельствует о хорошем совпадении выбранной модели регрессии с экспериментальными данными. Из графика также отчетливо видно, что величина аргумента при уравнениях прямолинейных зависимостей однозначно зависит от скорости вытягивания. На рис. 2 представлена зависимость величины аргумента от скорости вытягивания непрерывной заготовки.

Для аналитического описания экспериментальной зависимости представленной на рис. 2 наиболее подходит экспоненциальная зависимость вида:

$$k = \exp(0,81 \cdot v), \tag{8}$$

где k – коэффициент при уравнении прямолинейной зависимости;
 v – скорость вытягивания заготовки, м/мин.

Таким образом, искомая зависимость принимает окончательный вид:

$$L = \exp(0,81 \cdot v) \cdot R_0^2 \tag{9}$$

Для оценки адекватности предложенной зависимости были проведены расчеты глубины жидкой лунки по данным представленным в таблице и сопоставлены с экспериментальными значениями. Результат сопоставления представлен в виде абсолютной величины отклонения расчетных и экспериментальных данных в процентах.

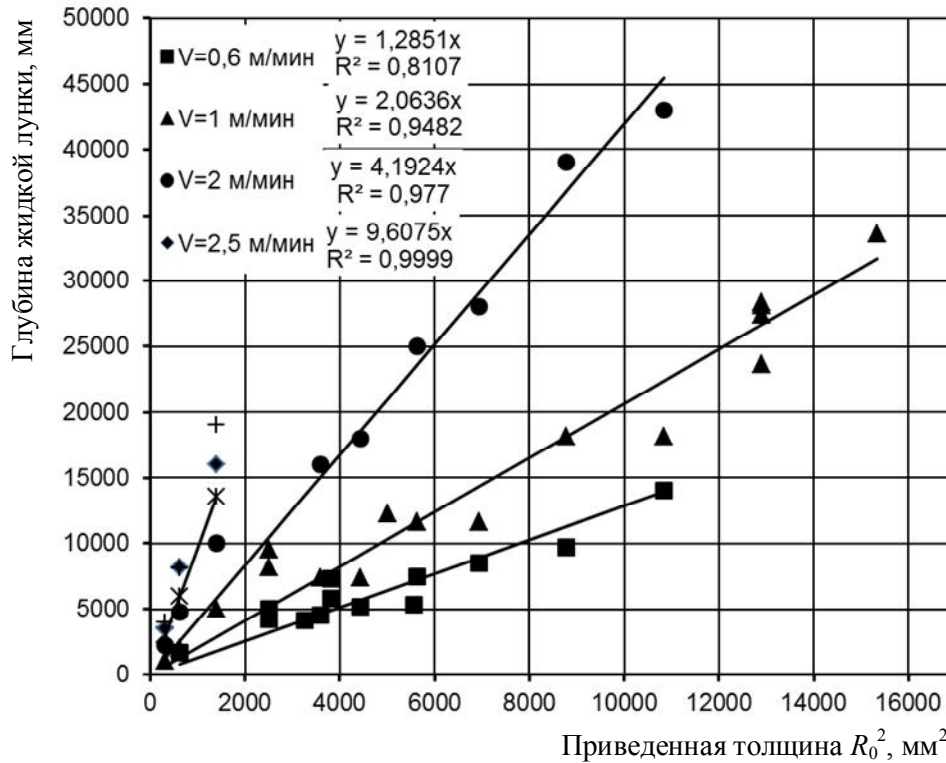


Рис. 1 – Изменение глубины жидкой лунки в зависимости от величин приведенной толщины R_0^2 и скорости вытягивания заготовки v м/мин

Для оценки адекватности предложенной зависимости были проведены расчеты глубины жидкой лунки по данным представленным в таблице и сопоставлены с экспериментальными значениями. Результат сопоставления представлен в виде абсолютной величины отклонения

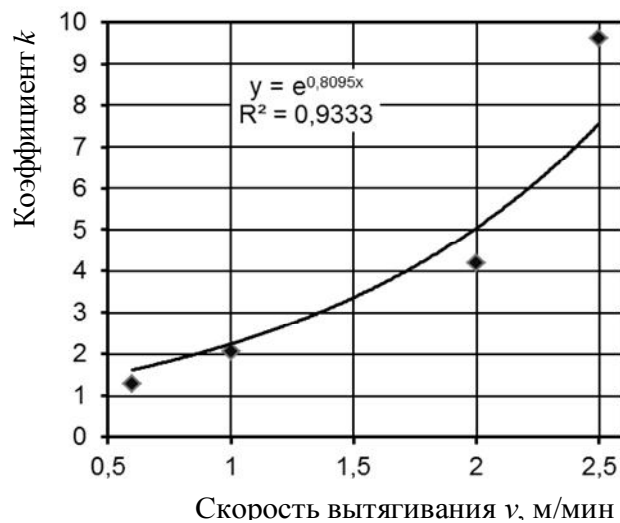


Рис. 2 – Зависимость коэффициента k от скорости вытягивания v м/мин

расчетных и экспериментальных данных в процентах. Средняя величина отклонения ставила 24%, отдельно для квадратных заготовок 22% и для прямоугольных 25%. Такая стабильность в показаниях отклонений говорит о целесообразности применения величины приведенной толщины непрерывнолитых слитков в качестве универсального показателя, применение которого позволяет составлять обобщающие зависимости для расчета глубины жидкой лунки в процессе непрерывной разливки стали. Большое значение величины отклонения обусловлено тем, что в представленном уравнении не учитываются такие важные технологические параметры как перегрев стали над линией ликвидус и интенсивность ее охлаждения (режимы вторичного охлаж-

дения), которые существенно влияют на значение искомой величины. Учет этих параметров позволит значительно повысить точность вычислений, поэтому в дальнейших исследованиях предполагается разработка комплексной зависимости глубины жидкой лунки от перечисленных технологических параметров непрерывной разливки стали.

Выводы

1. Проанализированы результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению глубины жидкой лунки в процессе отливки непрерывнолитых слитков в сечения различного типа, что позволило предложить применение значений величины приведенной толщины слитка в качестве основного параметра в уравнении для аналитического расчета глубины жидкой лунки.
2. В процессе статистического анализа обобщенных данных по глубине жидкой лунки получено уравнение зависимости ее глубины от приведенной толщины слитка и скорости вытягивания заготовки, применение которого показало целесообразность использования величины приведенной толщины слитков в качестве универсального показателя процесса их затвердевания.

Список использованных источников:

1. Гуляев Б.Б. Литейные процессы / Б.Б. Гуляев. – М. : Машгиз, 1960. – 416 с.
2. Скребцов А.М. Радиоактивные изотопы в сталеплавильных процессах / А.М. Скребцов – М. : Metallurgia, 1972. – 304 с.
3. Скребцов А.М. Исследование процессов формирования непрерывнолитого слитка с помощью радиоактивных изотопов / А.М. Скребцов, Д.А. Дюдкин // 50 лет непрерывной разливки стали в Украине : Сборник научных трудов конференции. – Донецк. – «Ноулидж». – 2010. – С. 75-83.
4. Рутес В.С. Определение глубины жидкой фазы и фронта кристаллизации в слитке при непрерывной разливке стали / В.С. Рутес, А.Г. Ильин // Заводская лаборатория. – 1956. – № 1. – С. 49-52.
5. Гуляев Б.Б. Затвердевание и неоднородность слитка спокойной стали / Б.Б. Гуляев // Стальной слиток : сборник трудов первой всесоюзной научно-технической сессии по стальному слитку. – М. : Metallurgizdat, 1952. – С. 21-39.
6. Хворинов Н.И. Кристаллизация и неоднородность стали / Н.И. Хворинов. – М. : ГНТИМЛ, 1958. – 392 с.
7. Теория непрерывной разливки / В.С. Рутес, В.И. Аскольдов, Д.П. Евтеев [и др.]. – М. : Metallurgia, 1971. – 296 с.
8. Соболев В.В. Кинетика формирования кристаллической структуры слитков прямоугольного сечения при непрерывном литье стали / В.В. Соболев, Д.Х. Девятов, П.М. Трефилов // Известия Вузов ЧМ. – 1990. – № 4. – С. 32-36.
9. Тепловые процессы при непрерывном литье стали / Ю.А. Самойлович, С.А. Крулевецкий, В.А. Горяинов, З.К. Кабаков. – М. : Metallurgia, 1982. – 152 с.

Bibliography:

1. Guljaev B.B. Foundry processes / B.B. Guljaev. – M. : Mashgiz, 1960. – 416 p.
2. Skrebcov A.M. Radioactive isotopes in steel-smelting processes / A.M. Skrebcov. – M. : Metallurgy, 1972. – 304 p. (Rus.)
3. Skrebcov A.M. Research of strand formation processes by means of radioactive isotopes / A.M. Skrebcov, D.A. Djudkin // 50 years of steels continuous casting in Ukraine : the Collection of proceedings of conference. – Donetsk. – «Noulidg». – 2010. – P. 75-83. (Rus.)
4. Rutes V.S. Definition of liquid phase and crystallization front depth in the strand during steels continuous casting / V.S. Rutes, A.G. Ilyin // Factory laboratory. – 1956. – № 1. – P. 49-52. (Rus.)
5. Guljaev B.B. Hardening and heterogeneity of quiet steel ingot / B.B. Guljaev // the Steel ingot: the collection of works of the first all-Union scientific and technical session on a steel ingot. – M. : Metallurgizdat, 1952. – P. 21-39. (Rus.)
6. Hvorinov N.I. Steel crystallization and heterogeneity / N.I. Hvorinov. – M. : GNTIML, 1958. – 392 p. (Rus.)
7. The Theory of continuous casting / V.S. Rutes, V.I. Askoldov, D.P. Evteev [etc.]. – M. : Metal-

- lurgy, 1971. – 296 p. (Rus.)
8. Sobolev V.V. Kinetics of crystal structure formation of rectangular section ingots at steel continuous casting / V.V. Sobolev, D.H. Devjatov, P.M. Trefilov // Proceedings of metallurgical higher educational institutions. – 1990. – № 4. – P. 32-36. (Rus.)
 9. Thermal processes at steel continuous casting / J.A. Samoylovich, S.A. Krulevetsky, V.A. Gorjainov, Z.K. Tabakov. – M. : Metallurgy, 1982. – 152 p. (Rus.)

Рецензент: В.Г. Ефременко
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 21.02.2012

УДК 669.18

©Харлашин П.С.¹, Буторина И.В.², Бендич А.В.³

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СТАЛИ КАК ФАКТОР ОПТИМИЗАЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Рассмотрена основная мировая проблема человечества – влияние металлургической отрасли на состояние окружающей среды. На основе разработанной математической модели дано описание материальных и энергетических потоков на предприятии с полным металлургическим циклом. Представлены основные принципы развития экономики в гармонии с окружающей средой планеты. Даны расчёты показателей для оценки эффективности экологического состояния в соответствии с природоохранными стандартами. Разработанная модель устойчивого развития даёт план первоочередных действий по предотвращению наиболее важных экологических проблем, позволяет определить основные направления оптимизации производства с целью улучшения экологических показателей.

Ключевые слова: окружающая среда, устойчивое развитие, математическая модель, жизненный цикл стали, экологические показатели, оптимизация производства, модернизация, эффективность.

Харлашин П.С., Буторина И.В., Бендич А.В. Математична модель життєвого циклу сталі як фактор оптимізації металургійного виробництва з метою покращення екологічних показників. Розглянута основна світова проблема людства – вплив металургійної галузі на стан навколишнього середовища. На основі розробленої математичної моделі дано опис матеріальних та енергетичних потоків на підприємстві з повним металургійним циклом. Представлені основні принципи розвитку економіки у гармонії з навколишнім середовищем планети. Дано розрахунки показників для оцінки ефективності екологічного стану у відповідності з природоохоронними стандартами. Розроблена модель сталого розвитку дає план першочергових дій щодо запобігання найбільш важливих екологічних проблем, дозволяє визначити основні напрямки оптимізації виробництва з метою покращення екологічних показників.

Ключові слова: навколишнє середовище, сталій розвиток, математична модель, життєвий цикл сталі, екологічні показники, оптимізація виробництва, модернізація, ефективність.

¹ д-р техн. наук, професор, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь

² д-р техн. наук, професор, Санкт-Петербурзький державний політехнічний університет, г. Санкт-Петербург, Росія

³ асистент, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь